



柳建新,赵然,郭振威. 2019. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展. 地球物理学进展,34(1):0151-0160,doi:10.6038/pg2019CC0222.

LIU Jian-xin, ZHAO Ran, GUO Zhen-wei. 2019. Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(1):0151-0160,doi:10.6038/pg2019CC0222.

## 电磁法在金属矿勘查中的研究进展

## Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits

柳建新<sup>1,2</sup>, 赵然<sup>1,2</sup>, 郭振威<sup>1,2\*</sup>

LIU Jian-xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Ran<sup>1,2</sup>, GUO Zhen-wei<sup>1,2\*</sup>

1. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083

2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室,长沙 410083

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2. Hunan Key Laboratory of Nonferrous Resources and Geological Hazard Exploration, Changsha 410083, China

**摘要** 电磁法勘探是以地壳中各种类型的岩石矿体导电性、导磁性等电磁学的性质为基本依据,通过对各类电场及电磁场在空间上的分布规律及时间特征进行观测和研究,找到各种有用的矿体、探明区域地质构造以及解决具体地质问题的一种地球物理勘查方法。地球物理电磁法多年来已在世界各地的铜矿、钨矿、铅锌矿、铝土矿、深部铀矿、海底热液多金属硫化物矿等金属矿产资源勘查中起到了重要作用。为了在未来将该地球物理方法更好地应用于金属矿的勘探开发工作,有必要对各种电磁法在应用时表现出的优缺点及未来发展走势作出详细分析。本文主要针对电磁法在金属矿产资源勘查中的应用与发展,对电磁法勘探的原理、仪器、各种分支方法、数据处理技术、反演解释等方面做出比较全面的论述,同时介绍了电磁法在陆地、空中、海洋等不同环境中的找矿实例与应用效果。未来电磁法勘探仪器将朝着高精度高分辨率、集成化采集、实时处理能力、便于携带的方向发展,数据处理方面将融合多种地球物理方法进行联合反演及开展多学科交叉研究,而且电磁法的应用领域不再局限于地面和井中,航空电磁法和海洋电磁法在未来金属矿勘查工作中有着广阔的应用前景。

**关键词** 电磁法;金属矿;矿产勘查;研究进展

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2019CC0222

**Abstract** The principle of electromagnetic exploration is based on the difference of conductivity and permeability in the crust of various types of rocks. Measurements to the exploration show the distribution of electric and magnetic fields in space and time domains. The method is applied for mineral exploration or mapping a geological structure or solving the specific geological problems. Electromagnetic method is applied as an important tool for mineral exploration, such as copper, molybdenum, lead-zinc, bauxite, deep uranium, volcanogenic massive sulfide deposits and other metal deposits. In order to improve the electromagnetic method, it is necessary to review the advantages and disadvantages for the electromagnetic method application of mineral exploration. In this paper, we are mainly focusing on the applications and progressing of electromagnetic method in the metal mineral exploration. We also review the development of electromagnetic method for instance, prospecting, equipment, bifurcation method, data processing, modeling, inversion and interpretation. The prospecting examples are reviewed in different environments including land, borehole, aviation and ocean. The electromagnetic prospecting instruments will develop in the direction of high precision, high resolution, integrated acquisition, real-time processing and portability in the future. The data processing will combine multiple geophysical methods for joint inversion and interdisciplinary research. Moreover, the application of electromagnetic data is no longer confined to the ground and the borehole. The airborne electromagnetic method and the marine electromagnetic method have a broad application prospect in the future of metal prospecting.

**Keywords** Electromagnetic method; Metal deposits; Mineral exploration; Research development

## 0 引言

电磁法是以地壳中不同岩矿石之间电性差异为物理基础,通过观测研究人工或天然形成电磁场的时间和空间分布

规律,从而达到寻找地下有用矿产资源、查明地下地质构造以及解决地质问题的目的。电磁法可分为时间域方法和频率域方法两大类,主要有大地电磁法、音频大地电磁法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法、广域电磁法、伪随机电磁法、

收稿日期 2018-06-12; 修回日期 2018-10-24.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41674080)、中国博士后科学基金资助项目(2017M622607)和2018年中南大学研究生创新项目(502211803)联合资助。

第一作者简介 柳建新,男,1962年生,湖南岳阳人,教授,博导,主要从事电磁法理论与应用研究工作。(E-mail: ljx6666@126.com)

\* 通讯作者 郭振威,男,1985年生,博士后,主要从事电磁法勘探研究。(E-mail: guozhenwei@csu.edu.cn)

探地雷达法、甚低频电磁法等。电磁法按其作业空间又可分为地面电磁法、井中电磁法、航空电磁法、海洋电磁法等。电磁法勘探总体上具有成本低廉、绿色环保、设备轻巧、易于搬迁和施工灵活等优势,其获得的资料分辨率更高、探测更为精确,在金属矿产资源勘查领域具有广阔的应用前景。

## 1 电磁法勘探原理及研究进展

电磁法勘探是以地壳中各类岩矿石之间电磁性质差异为基础,如导电性、导磁性、介电性以及电化学性质的差异。场源发出的电磁场信号经各种媒介到达目标地质体后会产生感应信号,这些包含地质体感应信号的电磁波会被已布置好的接收器接收,通过观察分析接收到的电磁信号在时间和空间上的变化及分布规律,可寻找不同类型有用矿床、查明地质构造以及解决相关地质问题。瞬变电磁法最早由加拿大地球物理学家 Wait 于 1951 年提出,并于 1953 年获得专利权;20 世纪 50 年代,前苏联的 Tikhonov (1950) 和法国的 Cagniard (1953) 提出大地电磁法 (MT) 的理论基础;20 世纪 60 年代, Berdichevski 等 (1969) 提出音频大地电磁法 (AMT); Goldstein (1971) 提出可控源音频大地电磁法 (CSAMT); 随后,中南大学何继善 (1994, 2010a) 先后提出两种新的频率域方法,即广域电磁法 (WFEM) 和伪随机电磁法 (PREM)。本文重点介绍这几种发展成熟且应用广泛的电磁勘探方法,同时简要介绍其他几种常用的电磁勘探方法。

### 1.1 大地电磁法与音频大地电磁法

大地电磁法是以天然电磁场为场源来研究地球内部电性构造的一种重要的地球物理手段。前苏联的 Tikhonov (1950) 和法国的 Cagniard (1953) 于 20 世纪 50 年代初分别独立地提出通过测量相互正交的电场和磁场来计算大地的视电阻率,奠定了现代大地电磁法的理论基础。该方法采用天然场源,不受高阻屏蔽的影响,采用平面波理论,阻抗形式简洁且解释简单,勘探深度可达数百公里,设备轻便。其缺点是场源不可控制并且信号微弱,易受自然环境的影响,为了提高精度,需要对测量得到的数据进行多次叠加,致使观测时间变长,降低工作效率。从而不得不采用间隔很稀的测点和间隔很稀的频点,致使垂直和水平分辨率都很低,因此该方法主要用于深部大构造研究。

音频大地电磁法也是利用天然的大地电磁场作为场源,来测定地下岩石的电性参数,并通过研究地电断面的变化来达到了解地质构造和找矿等目的的一种地球物理勘探方法。该方法利用天然场源,抗干扰能力弱,仪器轻便,且适用于地形相对复杂的山区,理论上探测深度可达 2 km。美国的 Kennecott 在 1963 年最早观测出 AMT 信号,到 20 世纪 70 年代,人们才利用 AMT 信号解决实际问题,将其发展成为一种独立的勘探手段。法国的 Delaye 等 (1973) 研究了高频时位移电流的影响,从理论上论证了利用 AMT 法解决浅部地质问题的可能性。近半个世纪以来,AMT 在理论和技术上都取得很大的发展,仪器精度和测量效率均显著提高,在金属矿、油气藏、煤田和地热勘探等领域得到广泛应用。

由于这两种电磁法场源信号微弱,在实际工作中测得的大地电磁信号极易受其他干扰源影响,因此如何有效压制干

扰噪声、提高信噪比一直是学者们研究的重点。针对这个问题,我们可以选取低阻区内噪声小的电磁数据作为“远参考点”,选择合适的远参考点和本地测点之间的距离,再采用远参考技术对受噪声污染严重的电磁数据进行处理,可以有效改善电磁测深数据的相干度和信噪比。在使用远参考技术处理数据时,结合 Robust 估计会使数据质量进一步提高。当需要压制勘探区存在的强电磁干扰时,采用远参考法和 Robust 估计法则基本没有效果,这时可以运用数学形态滤波来解决这一问题。结构元素合理的数学形态滤波可以消除人工源强干扰,再利用阈值法除去脉冲信号,就可以有效地改善中低频数据质量 (汤井田等, 2015a)。张量阻抗分解法在电磁测深中的应用是近几年研究的一个重点,在数据处理时运用该方法可以校正大地电磁响应中的畸变参数,增强信号抗干扰能力。

### 1.2 可控源音频大地电磁法

由于天然场源信号弱且不能人为控制, Goldstein (1971) 提出采用人工场源代替天然场源,在电磁波接近平面波的远区工作,这样就可把均匀大地上电偶极子场源的电磁场表达式加以简化,得到了卡尼亚电阻率表达式,据此提出了可控源音频大地电磁法。

CSAMT 具有 3 个特点:一是用人工场源;二是主要使用音频频率;三是仍用卡尼亚公式计算视电阻率。与 MT 法相比,CSAMT 法使用人工场源,克服了 MT 法场源随机性的缺点,信号强度相比 MT 法也大大提高 (Sandberg and Hohmann, 1982; 汤井田和何继善, 1994, 2005)。它的工作效率、精度以及纵向和横向分辨率都有明显提高,在勘探深部金属矿和查明地质构造等领域被广泛采用。CSAMT 法也有它固有的缺点,一般在距场源数公里到十多公里的地方进行测量,很容易进入过渡带,这时却仍然按照卡尼亚公式计算视电阻率,会引入不小的人为误差。此外,场源效应与静位移效应会不同程度影响该方法获得的数据质量,而且其探测深度较 MT 要小。

改进与完善 CSAMT 法三维模型正反演数值模拟,对进一步提高资料解释水平及应用效果具有重要理论和现实意义。国外对三维电磁场正演模拟的研究始于 20 世纪 70 年代中期, Hohmann (1975) 在麦克斯韦方程组的基础上首次将积分方程法应用于三维大地电磁测深数值模拟中,之后便有许多学者使用积分方程法、三维有限元法和有限差分法对异常体及地下电性复杂分布情况进行了模拟。国内不少学者在此方面也开展了大量研究工作,底青云等 (2006) 在 2.5 维有限元正演模拟的基础上,对倾斜低阻异常体模型采用 CSAMT-RRI 灵敏度矩阵法进行反演,反演出的电性结构与真实电性结构表现出很好地拟合效果。目前使用可控源音频大地电磁法实际采集数据时多以单个源采集标量数据为主,但是这种工作方式会限制 CSAMT 探测复杂地质构造的能力。随着 CSAMT 张量观测系统的推出,为了满足精细电磁法勘探需要,采用张量测量的 CSAMT 法已成为近几年的研究热点,谢茂笔等 (2017) 设计三维低阻地电模型,采用交错网格有限差分法实现了 CSAMT 张量数据的三维正演,通过计算并对比分析标量和张量阻抗的响应特征,深化了对 CSAMT 三维张量阻抗特征的认识,以便于更好地在实际工作中进行张量

采集.

### 1.3 广域电磁法

CSAMT 法视电阻率定义在非波区会产生严重畸变,影响测深曲线的解释.虽然可以校正波区视电阻率定义在近区的畸变效应,但没有实际意义,导致 CSAMT 法的过渡区和近区数据基本无用,造成极大浪费(何继善,1991),这就需要一种新的方法来合理地利用中间区的测深数据.何继善(2010a)系统地提出了广域电磁法(WFEM),从场的统一性出发,将“近区”、“过渡区”和“远区”有机地统一起来,改善了非远区的畸变效应,使得电磁测深能在广大的、不局限远区的区域进行.与 CSAMT 相比,同等条件下,WFEM 有效观测的平面范围大、获得的观测信号强、数据精度高、对地下电阻率的变化较敏感,能够比较真实地反映地下电阻率的变化,该方法只测量一个电场分量  $E_x$ ,通过计算机迭代提取视电阻率,其最大优点是布置一次场源可以有效观测的平面范围大,野外移动场源的次数少,装备轻便,工作效率高.

何继善(2010a)实现了各种水平电流源广域电磁法一维正演,比较了广域电磁法与其他电磁测深法的探测能力,对比分析了广域电磁法中不同场源和不同观测方式的异同点.采用积分方程方法进行  $E-E_x$  广域电磁法三维正演,结果表明无论是高阻异常体还是低阻异常体,广域视电阻率的分辨能力都比采用卡尼亚视电阻率时要好(李帝铨等,2013).为了消除广域测量时观测方位的影响,可利用广域视电阻率定义方法定义  $E-E\varphi$  方式的广域、远区、近区视电阻率,再经过适当校正,任意  $\varphi$  角的测深曲线即可真实反映地电断面随深度的变化情况(柳建新,1990;柳建新等,2013).基于全区视电阻率概念,中南大学设计出基于 AD7762 模数转换器的广域电磁法接收机采集器,并成功研制出 JSGY-2 广域电磁仪,其工作频率范围为 3/256 ~ 8192 Hz.该仪器可在远区至近区的广大区域进行观测,拓宽了观测范围.为了进一步提高广域电磁仪接收机系统的精度和性能,相关研究人员对广域电磁仪中的双 T 陷波器进行了优化设计,并将 ARM Cortex-A8 微处理器 AM3517 应用在广域电磁接收机中以实现主控功能,同时开发了数据可视化的预处理软件,使得预处理的工作效率和预处理后的数据质量都有了极大提高.目前,JSGY-2 广域电磁仪已经广泛应用在金属矿、油气藏、页岩气、地热等勘探领域.

### 1.4 瞬变电磁法

瞬变电磁法是一种时间域电磁法,它是以岩(矿)石的导电性、导磁性差异为基础,根据电磁感应原理,利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场的间隙期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场,并研究该场的空间与时间分布规律,来达到寻找地下矿产资源或解决其他工程地质问题的目的.瞬变电磁法具有探测深度大、分辨率高、受静态位移影响小、抗干扰能力强、施工快捷、不受高阻层屏蔽及受地形影响小等特点,成为勘探金属矿的一种重要手段.随着技术的进步和仪器的发展,瞬变电磁法并不局限于勘查金属矿,逐渐在探查石油、煤炭等非金属矿产、工程地质勘察以及隧道超前预报等领域都有广泛应用.在实际工作中该方法也遇到了很多问题,这就需要研究瞬变电磁法精细探测技术(薛国强等,2007,2008).

目前,瞬变电磁法的研究方向包括地面瞬变电磁法、井中瞬变电磁、航空瞬变电磁法、海洋瞬变电磁法以及相互结合的地井瞬变电磁法、地空瞬变电磁法等多个方向.多道瞬变电磁法(MTEM)是地面瞬变电磁法领域近年来勘查矿产资源的一种新技术,该方法采用伪随机编码为发射源以提高信噪比,采取拟地震多道观测,同时测量感应电压和发送电流,对得到的大地脉冲响应进行类地震资料处理,探测深度大且精度高(薛国强等,2016a).矿井瞬变电磁法与地面瞬变电磁法不同,表现为全空间响应、且井下施工受限、人文干扰多,这些都给井下瞬变电磁精细探测带来很大困难.岳建华等(2012)建立了不同层状地质模型,采用有限差分法分析矿井瞬变电磁全空间响应的响应特征和影响因素,以便更好地在井中开展工作.殷长春等(2015a)研究了地下三维良导体磁场和磁感应分量的时间域航空瞬变电磁响应,分析不同发射波形、不同磁场和磁感应分量及其在发射波开断期间的航空电磁系统的探测能力,并设计出一套最佳航空瞬变电磁观测系统参数组合,便于提高观测精度和观测效率.在海洋瞬变电磁领域,李予国和 Constable 分析了浅水域的瞬变电磁响应,结果表明在浅水域瞬变电磁法采用表面拖拽系统更为简便.对深海域的热液硫化物矿采用全空间矢量有限元法进行三维瞬变电磁正演,可以得到异常幅值明显、边界清晰的瞬变电磁响应,并与物理模拟结果表现出良好的一致性(李瑞雪等,2016).

### 1.5 其他电磁勘探方法

在探查金属矿方面,除以上几种常用的电磁勘探方法外,还有几种比较常用的电磁勘探方法,这些方法包括伪随机电磁法(PREM)、探地雷达法(GPR)、甚低频电磁法(VLF-EM)等.限于篇幅,本节将对这几种方法的最新进展做简要介绍.

伪随机电磁法(PREM)是中南大学针对矿与非矿异常区分这一世界性难题提出的一种地球物理勘探方法(何继善,1994;何继善和柳建新,2002).该方法从金属矿的电化学性质入手,通过对不同矿物的相位谱特征分析达到有效区分矿与非矿的目的.伪随机电磁法的核心是发明了一种多频信号带宽可控的、数个能量集中于对数坐标上呈等间距分布频率的伪随机电磁信号. $2^n$  系列伪随机电磁信号频带范围宽且可控,各主频振幅均匀,在电磁法勘探中可以提高观测速度和相对观测精度,是目前为止电法勘探的理想场源(何继善等,2009;何继善,2010c).伪随机中  $m$  序列是编码电磁法的另外一种形式,自相关性良好且频带宽,同样可以增强电磁勘探系统的信噪比和抗干扰能力.陈儒军等建立了伪随机多频电磁法的面向对象模型,研制出了高精度、性能稳定可靠的多频电磁观测系统.柳建新等(2001)将伪随机电磁法用于广西泗顶铅锌矿区外围矿体勘探,成功区分了铅锌矿和碳质地层异常.多年来中南大学相关研究人员在全国二十多个金属矿山的矿与非矿区分中均获得良好结果,证明了该方法的实用性与有效性.

探地雷达(GPR)是以探测地下不同介质的电磁性质(介电常数、电导率、磁导率等)差异为物理前提的一种射频(0.1 ~ 3 GHz)电磁技术.GPR 法是对接收到的电磁波信号进行处理和分析,来研究地下地层的结构进而识别地下目标

体. 由于该方法工作频率高, 勘探深度有限, 井中探地雷达工作时经常会受到井下复杂环境的影响, 井下巷道中废弃的钢轨、铁水管等金属物体在雷达图像中常呈双曲线型的干扰图. 另外, 井下局部潮湿及巷道、采场表面的局部地形变化都会使探地雷达电磁波的辐射特征发生改变, 造成电磁波能量不能耦合进入地下, 会严重影响雷达成像质量, 因此探地雷达法一般不用于矿产资源勘探, 而常用于矿山采空区和巷道超前探测. 在使用探地雷达法勘查金属矿及其采空区时, 为了改善图像质量, 应该尽量避免各种干扰源, 工作时工区内最好停止其他生产工作, 同时采用屏蔽天线, 对所获得数据进行必要的滤波和去噪. 在浅层地段, 探地雷达法不仅探测精度高, 分辨率也高, 可实现浅部采空区的定位预测, 结合 EH-4 电导率成像法可更准确地探测露天矿采空区(戴前伟等, 2010). 近年来, 随着地下金属管道及金属物体的增多, 探地雷达法在查明废弃含油管和探测浅部金属目标体领域中应用日益广泛, 探测效果较好.

甚低频电磁法(VLF-EM)是一种利用长波电台发射信号在大地上所建立的电磁场来进行地下勘探的地球物理方法. 发射台发射的电磁场在具有电性差异的地质体中会感应出二次场, 二次场与一次场叠加后产生的总场在方向、强度、相位上和一次场、二次场也不相同, 甚低频电磁法就是通过测量不同地理空间位置总场的差异来识别地质异常体. 我国研制出的甚低频电磁仪 DDS 系列仪器具有轻便、方法简单、经济高效、探测脉状矿体灵敏度高的特点. 实践表明, 甚低频电磁法在浅部金属矿勘探以及隐伏金属矿的空间定位预测中应用效果显著. 数据处理方面, 可以采用 VBA 编程技术和 Excel 电子表格软件来实现甚低频电磁仪测量数据自动处理, 这将大大减少数据处理时间、降低劳动强度、提高工作效率(李永兵等, 2005). 浅层矿经过长时间开采已越来越少, 为了将甚低频电磁法更好地运用在深部隐伏矿体的勘查工作中, 牛有田等(2016)将甚低频电磁法与软件无线电技术相结合以更准确地对隐伏金属矿体进行定位, 并研制出基于软件无线电的甚低频电磁法探矿接收机.

## 2 电磁法主要装备

不同电磁法的仪器各不相同, 同一种电磁法因其勘探对象、应用环境不同所生产的仪器也多种多样. 现对国内外勘查金属矿常用的几种电磁法(包括 MT、AMT、CSAMT、WFEM、TEM、PREM)仪器做简要介绍.

目前, 国际上普遍用于地球物理勘探的电磁测深仪器主要有以下几类: 加拿大凤凰公司(Phoenix)的 V-5 系列、V-6 和 V-8 多功能观测站, 这三套系统均可对多种电磁数据进行采集, 包括 MT、AMT 和 CSAMT; 美国 Zonge 公司的 GDP-32<sup>II</sup> 多功能电法系统, 可实时进行数据采集和处理解释, 测量频带范围宽, 可用于 MT、AMT 和 CSAMT 观测; 美国 Geometrics 公司和 EMI 公司联合生产的 EH4 电磁成像系统, 该系统设备轻便、工作效率高、资料解释简捷、图像直观, 可进行高分辨率 AMT 数据采集; 德国 Metronix 公司的 GMS-07e 综合电磁系统, 可进行多通道同时采集, 通频带最宽, 覆盖了所有地球物理电磁场的频率范围, 可用于 MT、AMT 观测和 CSAMT 观测. 以上仪器在我国金属矿勘查工作中均有使用, 目前在

国内主要引进使用的测深仪器主要包括 V-8 多功能观测站、GDP-32<sup>II</sup> 多功能电法系统、EH4 电磁成像系统和 GMS-07e 系统.

瞬变电磁仪以地面勘探和井中勘探为主, 加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM 系列地面瞬变电磁仪可以进行三分量同时或顺序观测, 具有勘探深度大、分辨率高、信噪比高的特点. 澳大利亚产的 Terra-TEM 采用发射接收一体化技术, 可单道也可多道接收, 人机交互能力增强, 便于操作. 澳大利亚研制的 SM24 瞬变电磁系统是世界上唯一真正的 24 位瞬变电磁接收机, 兼容所有发射机与接收线圈, 同时也是世界首款可以测量磁感应强度的瞬变电磁系统, 能够全时间进行段数据记录与回放, 采集更丰富的信息以便于噪声分析. 常使用的瞬变电磁仪器还包括美国 Zonge 公司的 GDP-32<sup>II</sup> 多功能电法系统, 加拿大 Phoenix 公司的 V-6、V-8 多功能电磁系统等. 国内生产瞬变电磁仪器的厂家较多, 但仪器的稳定性、重复性及智能化和国外仪器相比还有一定差距, 代表性仪器有中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所研制的 WDC 系列瞬变电磁仪, 中南大学主导研发的 SD 系列瞬变电磁仪和 TEMS 系列瞬变电磁系统, 西安强源物探研究所研制的 EMRS 系列瞬变电磁仪, 中煤科工集团研制的 YCS50、YCS2000A 等井下防爆瞬变电磁仪, 中国地质大学生产的 CUGTEM 便携式矿用瞬变电磁仪等(薛国强和于景邨, 2017). 航空领域和海洋领域的瞬变电磁收发装置正处在研发和改进阶段(殷长春等, 2015b; 周建美等, 2016). 近年来兴起的多道瞬变电磁法还处在探索阶段, 不过国外的 MTEM 公司和中国科学院等单位已经研制出多种多通道大功率瞬变电磁仪, 在陆地和海洋环境中均有成功应用的实例(薛国强等, 2016a).

广域电磁法是我国何继善院士发明的一种新的人工源电磁勘探方法, 该种勘探方法和仪器正处于推广和完善阶段. 中南大学成功研制出 JSGY-2 广域电磁仪, 该仪器可在远区至近区的广大区域进行观测, 其工作频率范围为 3/256 ~ 8192 Hz, 使用  $\alpha$  伪随机信号, 以伪随机电流波形为场源激励波形进行电磁法勘探, 只测一个分量(目前为电场分量), 具有勘探深度大、效率高、精确度高、适应性强等特点.

伪随机电磁仪主要由中南大学和湖南继善高科技有限公司生产, 主要仪器有 WDD 型伪随机多功能仪、WSJ-4 伪随机信号多功能数字化激电仪. 这些仪器的发送机均预先设置多组多频伪随机信号, 可根据实际勘探任务需要选用一至两组多频伪随机信号, 接收机可根据发送信号的频组来选择性测量包含地下岩矿石信息的感应信号, 通过计算分析获得的信号达到区分矿与非矿的目的(何继善等, 2009).

随着嵌入式技术、并行处理技术、无线技术等应用于地球物理仪器, 电磁法仪器已逐步实现采集系统的集成化, 观测频率范围也更广, 分辨率更高, 还具有低功耗、高精度、实时处理能力强、体积小、便于携带等特点(柳建新等, 2017), 已经成为勘查金属矿的一把利刃.

国外电磁法仪器发展速度快, 已发展为成熟的商业仪器. 相比之下, 国内虽然生产电磁法仪器的单位较多, 但其性能与国外仪器相比还存在一定差距. 但随着我国在地球物理方面投入和研究力度日益加大, 国内外仪器差距将越来越

越小。

### 3 电磁数据处理和反演技术

#### 3.1 电磁数据的处理

对于天然场源的 MT 和 AMT 来说,其电磁资料的常规处理是从观测电磁场的时间序列中提取反映地下探测目标地电特征的各种频谱成分,并计算相应阻抗张量元素。其核心问题是压制各种形式的干扰,提高信噪比。而 CSAMT 法由于引入人工源,信噪比得到大幅提高,其数据处理技术重点在非平面波效应、阴影效应和场源附加效应的识别与压制等方面(汤井田等,2015b)。WFEM 则克服非平面波效应,在近区和过渡区测得的数据仍可使用。总体来说,各类电磁法的数据处理流程主要包括预处理(数据的解编转换、去飞点、曲线的编辑平滑、极化模式识别)、静位移校正、地形校正、干扰噪声的压制、场源附加效应的识别与压制等。静位移校正和噪声的压制一直是国内外电磁法领域研究的重点和热点,现对这两点着重论述。

静位移校正是大地电磁测深法资料处理必不可少的环节,主要目的是减小近地表不均匀体和地形起伏造成大地电磁测深曲线平移效应(柳建新等,2006)。静位移校正的方法有很多,包括电磁阵列剖面法(EMAP)(Bostick, 1986)、曲线平移法(Zonge and Hughes, 1998)、MT 资料自身校正法(Jones, 1988)、阻抗张量校正法(Bahr, 1988; Groom and Bailey, 1989)、联合 TEM 数据校正(Sternberg *et al.*, 1988)等。国内外有许多专家学者仍在不断对以上方法进行总结和改进,以便更好地降低电磁观测中静态效应。采用阻抗张量分解法对 MT 数据实施静位移校正,可减弱地表不均匀体对阻抗张量的影响,更好地确定区域构造特征。或者将静位移作为一个反演参数,采用静态效应直接反演法对静位移进行校正,也表现出较好的压制效果。除以上方法外,空间滤波法也是在数据处理中被广泛应用于静态校正的方法,它是利用迭代的思想将平面聚类法和首枝重合法结合对测深数据进行静校正,可有效处理大规模电磁测深资料。总之,静位移效应是中低频电磁勘探方法在实测过程中不可避免的一种畸变效应,研究人员根据不同实际情况来运用不同的方法进行静校正,均取得了很好的效果。

目前压制噪声的主要方法有远参考技术、张量阻抗分析、Robust 估计、形态滤波法等。在 MT 和 AMT 电磁资料观测中,由于场源是天然大地电磁场,信号弱,非常容易受其他噪声干扰。对于含近源干扰的 MT 数据,可以采用远参考技术处理大地电磁数据,以此提高 MT 数据质量,张刚等(2016)对比分析了远参考技术在不同噪声强度和不同参考道情况下处理大地电磁数据的效果,以便更好应用该技术处理大地电磁资料。基于遗传算法的大地电磁阻抗张量分解法可以有效校正地表不均匀体产生的畸变效应,把改进的截断最小二乘估计应用在大地电磁阻抗张量估计中,不仅对飞点表现出很强的抵抗性,而且估计结果还保持很高的统计有效性。将 Robust 阻抗估计算法应用于 AMT 实测数据处理,可以有效抑制数据中的非高斯噪声,处理后的数据稳定,飞点减少,相位曲线也更加平滑。远参考技术、张量阻抗分析以及 Robust 估计法对非相关噪声有很好的压制效果,但对矿区存

在的强电磁噪声(相关噪声)的压制效果并不好,于是有学者提出空间滤波法来解决这一难题。汤井田等(2012)对大地电磁强干扰首先采用数学形态滤波的方法进行分离,可以达到有效降噪的效果;采用结构恰当的数学滤波和阈值法结合的技术也可以有效压制 AMT 数据中的强干扰噪声(汤井田等,2015a),可提高数据的可靠性;把经验模态分解和数学形态滤波结合形成组合滤波,再对大地电磁信号中时域信号进行滤波处理,去噪效果更好。除以上几种压制噪声的方法外,Hilbert-Huang 变换也被用于大地电磁信号的噪声识别和筛选,从而提高资料处理的质量(蔡剑华和肖永良,2017)。

此外,有专家在其他电磁数据处理环节上开展相关研究。为了校正地形起伏对电磁观测数据的影响,薛国强等(2016b)在地形对电磁数据影响规律及经典比值校正原理的基础上,用实测标准电阻率替代数值模拟中均匀半空间电阻率,提出了一种新的地形影响快速校正公式,并把它应用于仿真 CSAMT 数据校正和 TEM 实测数据校正,校正结果中发现消除地形影响的同时保留了地质结构的影响,该方法表现出很好的应用效果。

#### 3.2 电磁数据反演技术

数值模拟普遍用于 MT、AMT、CSAMT、WFEM、TEM 数据反演中,数值模拟方法通常分为三类:积分方程法、有限差分法和有限单元法。Everett(2012)对有限差分法、积分方程法的优缺点做了详细介绍,本节重点介绍有限单元法在电磁模拟中的应用。自从 Coggon(1971)首次将有限单元法应用到电磁模拟以后,数值模拟方法发展非常迅速,主要体现在微分控制方程、有限元空间、网格离散化技术、线性求解器等四个方面(汤井田等,2015a,b)。低频情况下,势场方程对求解器的要求比电场方程低,两者有各自的使用条件。有限元空间中的向量基函数代替节点型基函数,已逐步成为地球物理电磁场数值模拟的标准方式。求解器方面,基于 MPI 并行的直接法求解器比迭代求解器更易解决大规模的电磁问题(Puzyrev *et al.*, 2013)。为了适应复杂的地形,网格离散化技术已经从结构化网格过渡到非结构化网格。基于非结构化网格技术,可实现对局部网格加密的三维电阻率法有限元模拟(任政勇和汤井田,2009)、2.5 维直流电阻率自适应有限元模拟(Tang *et al.*, 2010)以及四面体网格自适应加密的有限元模拟(Ren *et al.*, 2013)等。

反演算法是一个优化过程,目前常用的反演算法归纳为两类:非线性反演算法和线性迭代算法。线性迭代算法主要包括高斯-牛顿算法及其变种、共轭梯度算法及其变种。近几年高斯-牛顿算法在可控源电磁法反演中应用广泛,而共轭梯度法与其相比具有计算耗时小的优点。在大地电磁问题中,观测函数和地电参数之间是高次非线性函数,参数越多,非线性越严重,反演结果也越依赖于初始模型。稍有不慎就会陷入局部极小而不能自拔,甚至造成振荡和不收敛。为了克服上述线性反演的诸多弊端,近年来,国内外专家已研究出许多非线性反演方法。非线性反演算法包括人工神经网络法、模拟退火法等。非线性反演算法最大的优点是可避开局部极值,搜索出全局最优模型。非线性反演算法目前仅适用解决一维或小规模二维反演问题,线性迭代算法则适用于二维和三维电磁问题(汤井田等,2015b)。正演和反演是电磁



数值模拟中密不可分的一个整体,提高正演计算效率的同时也提高了反演计算效率,将促进反演算法的发展,所以如何提高正演计算效率仍是研究的重点。

由于存在反演多解性问题,联合反演逐渐被应用于电磁资料的数据处理.不同电磁法间可以联合反演,例如将直流电阻率法和大地电磁法进行二维联合反演,便于准确了解地下地质结构;还可将电阻率和地震波速度耦合在一起,进行大地电磁和地震的同步联合反演.另外,随着计算资源大幅度提高,存在各向异性介质的反演越来越成为一个研究热点.罗鸣等(2016)在一维电阻率垂直各向异性介质下,应用高斯-牛顿法对频率域海洋可控源电磁实测数据进行反演,能准确重构电阻率各向异性地电模型;嵇艳鞠等(2016)针对实际存在的起伏地形和各向异性问题,采用无网格法对不同各向异性系数的异常体模型进行数值模拟,为研究存在复杂地质结构的电磁场特征奠定了基础。

## 4 电磁法勘探技术在国内外找金属矿中的应用

### 4.1 地面电磁法勘探

大地电磁法和音频大地电磁法成功找到金属矿的案例很多,我国在西藏拿若斑岩型铜矿区就进行大地电磁数据处理和反演解释,总结出大地电磁在寻找斑岩型铜矿方面的工作经验;在加拿大 Sudbury 铜镍矿区、俄罗斯 Molaya Botuobiya 及 Zimniy Bereg 金伯利岩矿区应用效果显著.利用音频大地电磁测深法在青海门源找到钼矿,并推断出该区深部矿体的位置和规模;利用音频大地电磁法在贵州威宁秋木构工区成功勘查铁多金属矿,圈出其有利部位,与钻孔资料相吻合;在黑龙江省白石砬子地区利用音频大地电磁法完成大明山蚀变型金矿点的探测工作,为钻孔工作提供重要基础依据;在加拿大 Athabasca 盆地联合使用音频大地电磁法和瞬变电磁等多种方法发现 Shea 河铀矿.在青海锡铁山老矿区的浅部已知矿开采殆尽的情况下,利用 CSAMT 法成功找到深部隐伏铅锌矿;使用 CSAMT 法在辽西康杖子区发现铁钼深部矿体,在湖南锡矿山北部和贵州独山地区成功找到深部铋矿体,对寻找同类深部铋矿具有指导意义;在墨西哥 San Nicolás 块状铜锌硫化物矿区进行标量 CSAMT 测量,数据反演结果与钻井得到的多金属硫化物矿体轮廓高度一致.广域电磁法在内蒙古自治区勘查银铅锌矿体表现出很好的效果,证明其寻找深部金属矿的有效性;在山东望儿山断裂带处探测出隐伏金矿富集的有利位置,圈定的部分异常区经开采证明有金矿存在;在安徽铜陵冬瓜山强干扰区发现大埋深的矿致异常.使用大回线源 TEM 技术在西藏沙让探查到特大型斑岩型钼矿床(薛国强等,2011);使用地井 TEM 法在安徽黄山岭铅锌矿区外围发现井旁盲矿异常,在湖北铜绿山铜矿的深部发现矿异常,在澳大利亚 Hillier 地区找到火山岩型银铅锌多金属硫化物矿,在澳大利亚发现埋深近百米的 Ernest Henry 黄铁矿型铜矿,在加拿大 Sudbury 铜镍矿集区深部发现特富铜镍矿体,该方法在探测深部盲矿和追踪矿体延伸方向方面效果显著.利用伪随机电磁法在湘西金矿深部找到 40 多吨金、15 万吨铋、6000 吨三氧化钨,在广西泗顶找到优质铅锌矿,在甘肃石膏坝找到铜铅锌金银多金属矿,在安徽铜陵凤凰山找到优质铜矿体等(柳建新等,2001;何继善和柳建

新,2002).探地雷达在金属矿区也得到应用,可用于探查岩金矿脉,查明砂金的基底起伏构造和矿层的分布,还可以用于勘查钼矿、铅锌矿采空区等.采用甚低频电磁法对赤峰紫胡栏子金矿床区域进行空间定位预测,在龙头山矿区中成功划分出隐伏-半隐伏银铅锌矿化带.电磁法在金属矿勘查中的应用实例还有很多,为我国矿产资源的开发利用做出巨大贡献,随着陆地上浅部矿产资源日益减少,如何更加有效地勘查并开发深部矿和隐伏矿成为电磁法技术发展的重点。

### 4.2 航空电磁法勘探

航空电磁法找矿领域,主要以航空瞬变电磁法找金属矿为主.最早的航空电磁勘探系统要追溯到 1948 年,固定翼航空电磁系统 Stanmac-McPhar 在加拿大成功试飞.1954 年,应用航空电磁法在加拿大的 New Brunswick 地区发现了 Health Steele 矿床,促进了航空电磁法在金属矿领域的发展. Geotech 公司使用其研发的时间域航空电磁系统 VTEM 和 ZTEM 在坦桑尼亚地区 Victoria 对金进行勘查,在 North Arizona 等地勘查铀矿,在 Nevada 东南部勘查金银矿床,在加拿大 Ontario 省勘查铜镍矿等. Fugro 公司(现为 CGG 公司)在 2000 年使用航空瞬变电磁法在加拿大发现 Perseverance、Perseverance West 和 Equinox 三处多金属矿床. CGG 公司在澳大利亚西部使用 GEO-TEM 找到镍矿,在加拿大 Lalor 湖处使用 Heli-TEM 找到火山成因的硫化物矿.航空电磁法在国内的研究始于 20 世纪 50 年代末,一直到 20 世纪末,国内航空电磁法开发基本处于停滞状态.进入 21 世纪后,为了更好地在地形条件复杂的地区进行快速勘查,航空电磁法成为我国发展的一个重点.目前我国自主研发的系统主要有中国地质科学院地球物理地球化学勘查所研发的固定翼三频航空电磁系统 HDY-402 和国土资源航空物探遥感中心研发的 CHTEM 时间域直升机航空电磁勘查系统.这些系统发射功率较小,受飞行高度影响导致接收到的信号较弱,主要用于勘查浅部矿产,尚未在深部金属矿产资源勘查中获得很好的实际应用效果.自 2013 年核工业航测遥感中心引进加拿大 Geotech 公司研发的 VTEM 航空电磁观测系统之后,我国已在青海、新疆、内蒙古、黑龙江、吉林等地完成 12 个航空电磁测量项目.其中,在新疆哈密阿奇山-黑尖山测量区发现银铜矿化体,在内蒙古翁牛特旗测区发现银铅锌多金属成矿带。

### 4.3 海洋电磁法勘探

就目前海洋电磁法而言,主要使用海洋大地电磁法、海洋瞬变电磁法及海洋可控源电磁法探测海底金属矿产.美国 Scripps 海洋研究所在东太平洋海隆进行海洋大地电磁试验,对得到的数据进行二维反演,证明海洋 MT 法应用在地壳和浅部地幔的电阻率成像中是可行的(Key and Constable, 2002);采用海洋可控源电磁法对 Loihi 海山进行电磁法勘查,绘制出该区域的电导率图像(Myer *et al.*, 2006). Swidinsky 等(2012)采用中心回线式的海洋瞬变电磁法对海底矿藏的空间分布进行圈定.最近几年,海洋电磁法探测海底热液多金属硫化物矿床已成为研究的焦点.郭振威等(Guo *et al.*, 2016, 2017)对海洋可控源电磁法在不同水深情况下数据采集方式的选择和 CSEM 数据反演进行了研究. Müller 和 Schwalenberg(2016)对印度洋中部山脊处块状硫化

物矿的海洋电磁数据进行了反演和电磁成像的研究. 可用海洋瞬变电磁法来研究海底热液硫化物矿的电磁响应, 席振铎等(2016)通过分析研究大西洋洋中脊及西南印度洋洋中脊热液硫化物矿实测数据, 将其简化为三维目标体, 进行瞬变电磁三维正演计算. Tegnander (2017) 用海洋 MT 和海洋 CSEM 法对大西洋洋中脊处的热液硫化物矿进行电磁建模和反演研究. 目前, 国内利用海洋电磁法勘查海底金属矿产资源还处于研究和试验阶段, 不过国外已经将该法用于海底热液硫化物金属矿的勘探中, 而且取得了良好的效果.

## 5 展 望

电磁法勘探应用领域广泛, 尤其在金属矿产的勘探中发挥着举足轻重的作用, 随着国土资源科技创新“三深一土”战略和国家“深地资源勘查开采”重大专项的实施, 我国矿产资源勘探正向陆地深部和深海发展, 要求电磁法勘探具有更大深度、更高精度、更广空间, 为此海洋电磁法和航空电磁法成为目前的研究热门. 本文就电磁法在金属矿勘探中的应用实况, 对其研究现状和未来发展作简要总结:

(1) 电磁法仪器. 电磁仪器已实现多种电磁法的集成化采集及三维采集, 采集的频率范围更广, 采集精度和效率均有明显提高, 采集设备也更加轻便. 目前国外生产的仪器在我国仍广泛使用, 但是我国已经能够自主研发一些电磁法仪器, 随着经济的发展和技术的进步, 国产仪器和国外仪器的差距必将越来越小并最终将取而代之.

(2) 电磁数据的处理技术. 目前应用于静位移校正的阻抗张量分解法和空间滤波法仍是研究热点, 很多专家学者对其进行改进. 以自身静位移作为反演参数的自身反演校正法重新被认识, 同时也期待新技术应用于电磁测深的静位移校正. 在提高数据信噪比方面, 除了传统的远参考技术、张量阻抗分析、Robust 估计外, 还产生了数学形态滤波、Hilbert-Huang 变换等新技术. CSAMT 法数据处理技术的发展则集中在非平面波效应、阴影和场源附加效应的识别与压制等方面. 广域电磁法则有效地利用了非远区的数据, 为非平面波效应问题的解决提供了途径.

(3) 电磁数据的数值模拟. 有限元法是求解复杂电磁法问题时常用的正演计算技术, 基于边的矢量有限元和可以离散化的非结构化网格可进一步提高有限单元法的计算精度和效率, 并且已成为研究的热点. 对于多源地球物理问题, 运用直接求解器法有时比传统的迭代法会更好. 与正演发展速度相比, 反演算法发展速度相对较慢. 非线性反演算法多适用于一维和二维地球物理问题中, 三维电磁反演时常采用线性迭代算法. 为了提高反演算法精度, 已开始将电磁数据与重力、磁法、地震等方法获得的数据进行联合反演. 与此同时, 电阻率的各向异性反演也得到很大重视.

(4) 实际应用方面. 电磁法技术在勘查金属矿方面应用非常广泛, 勘查的矿种包括银铜矿、铁矿、铝土矿、锰矿、锑矿、铅锌矿、金矿、铜钼矿、铜镍矿、钨矿、深部铀矿、海底热液多金属硫化物矿等. 随着陆地上浅部金属矿产资源开发殆尽, 人们已转至对隐伏矿、深部金属矿产以及海底金属矿产的开发与利用. 电磁法是勘探深部隐伏矿最有效的方法, 这也意味着与之相适应的电磁法仪器、电磁法数据处理与解释

等技术也亟待开发和创新, 综合使用多种电磁法对勘查金属矿产资源更加有利.

(5) 海洋电磁法. 自国家“863-820”主题设立以来, 海洋电磁法勘探技术与装备研究多次得到国家“863 计划”和重大科技专项的支持, 取得了长足的发展, 先后成功研制出我国第一套“海底大地电磁仪”及海底大地电磁数据处理技术、深水可控源电磁勘探系统以及国际上首套能够满足深海 6000 m 作业的“拖曳式瞬变电磁系统”. 拖曳式瞬变电磁系统参加了我国第 22 次、26 次、30 次、34 次和第 49 航次深海远洋科学考察, 并装备于“大洋 1 号”和“向阳红 10 号”远洋考察船. 海洋电磁法正从试验研究走向应用.

(6) 航空电磁法. 航空电磁法 (AEM) 通过研究由人工或天然形成的电磁场对地质体感应激发产生的异常场特征和规律来寻找矿体或解决某些地质问题. 1948 年夏季, Stanmac 和 McPhar 公司在加拿大进行了固定翼飞机 AEM 系统的首次成功试验飞行, 标志着 AEM 的诞生. 虽然中国航空电法与国际发展水平还有较大的差距, 但近几年发展形势喜人, 目前已有许多研究单位借助无人机和其他航空平台开发出多种 AEM 系统, 已在实际应用中取得了较好的效果, 可望在不远的将来我国的 AEM 技术将位于世界前列.

**致 谢** 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Bahr K. 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion [J]. *Journal of Geophysics*, 62(2): 119-127.
- Berdichevski N M, Borisova V P, Van Yan L I, *et al.* 1969. Electric conductivity anomalies within the Earth's crust in Yakutiya [J]. *Akad. Nauk SSSR (IZV)*, Ser. Fiz. Zemli, 10: 43-49.
- Bostick Jr F X. 1986. Electromagnetic array profiling (EMAP) [M]// SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. Society of Exploration Geophysicists, 60-61.
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting [J]. *Geophysics*, 18(3), 605-635.
- Cai J H, Xiao Y L. 2017. Applicability analysis of Fourier transform and Hilbert-Huang transform in the procession of magnetotelluric signal [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 32(4): 1548-1555, doi: 10.6038/pg20170418.
- Coggon J H. 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method [J]. *Geophysics*, 36(1): 132-155.
- Dai Q W, Yu K, Feng D S, *et al.* 2010. The application of ground penetrating radar and EH4 in goaf exploration [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 25(5): 1763-1768, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.033.
- Delaye M, Ribotta R, Durand G. 1973. Buckling instability of the layers in a smectic-A liquid crystal [J]. *Physics Letters A*, 44(2): 139-140.
- Di Q Y, Unsworth M, Wang M Y. 2006. 2.5-D finite-element CSAMT numerical inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 41(1): 100-106.
- Everett M E. 2012. Theoretical developments in electromagnetic induction geophysics with selected applications in the near surface [J]. *Surveys in geophysics*, 33(1): 29-63.
- Goldstein M A. 1971. Magnetotelluric experiments employing an artificial dipole source [M]. Ph. D. thesis University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
- Groom R W, Bailey R C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic

- distortion [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B2): 1913-1925.
- Guo Z, Dong H, Kristensen Å. 2017. Image-guided regularization of marine electromagnetic inversion [J]. *Geophysics*, 82(4): E221-E232.
- Guo Z, Dong H, Liu J. 2016. Comparison of marine controlled-source electromagnetic data acquisition systems by a reservoir sensitivity index; analyzing the effect of water depths [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(11): 113-119.
- He J S. 1991. Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics (in Chinese) [M]. Changsha: Central South University Press.
- He J S. 1994. Research of pseudo-random triple-frequency [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 4(1): 1-7, doi: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.1994.01.001.
- He J S. 2010a. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)* (in Chinese), 41(3): 1065-1072.
- He J S. 2010b. Wide Field Electromagnetic Method and Pseudo Random Signal Method (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press.
- He J S. 2010c. Closed addition in a three-element set and 2<sup>n</sup> sequence pseudo-random signal coding [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)* (in Chinese), 41(2): 633-637.
- He J S, Liu J X. 2002. Pseudo-random multi-frequency phase method and its application [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 12(2): 374-376, doi: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2002.02.036.
- He J S, Tong T G, Liu J X. 2009. Mathematical analysis and realization of a<sup>n</sup> sequence pseudo-random multi-frequencies signal [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 40(6): 1666-1671.
- Hohmann G W. 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling [J]. *Geophysics*, 40(2): 309-324.
- Ji Y J, Huang T Z, Huang W Y, *et al.* 2016. 2D anisotropic magnetotelluric numerical simulation using meshfree method under undulating terrain [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(12): 4483-4493, doi: 10.6038/cjg20161211.
- Jones A G. 1988. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment [J]. *Geophysics*, 53(7): 967-978.
- Key K, Constable S. 2002. Broadband marine MT exploration of the East Pacific Rise at 9° 50' N [J]. *Geophysical Research Letters*, 29(22): 11-1-11-4.
- Li D Q, Xie W, Cheng D X. 2013. Three-dimensional modeling for E-Ex wide field electromagnetic methods [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 23(9): 2459-2470.
- Li R X, Wang H, Xi Z S, *et al.* 2016. The 3D transient electromagnetic forward modeling of volcanogenic massive sulfide ore deposits [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(12): 4505-4512, doi: 10.6038/cjg20161213.
- Li Y B, Chen X S, Liu J M, *et al.* 2005. Quickly processing VLF-EM data from DDS-1 instrument using VBA and Excel [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(1): 225-230, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2005.01.039.
- Liu J X. 1990. Research and application of data processing system of controlled source audio-frequency magnetotelluric method (in Chinese) [Master's thesis]. Changsha: Central South University.
- Liu J X, He J S, Bai Y C, *et al.* 2001. An effective method to distinguish mine and non-mine -The theory and application of pseudo-random multi-frequency phase method [J]. *Chinese Geology* (in Chinese), 28(9): 41-46.
- Liu J X, Tong T G, Liu C M, *et al.* 2013. Recognition of electromagnetic field asymptotic properties and improved definition of wide field apparent resistivity on E-E<sub>φ</sub> array [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 23(9): 2359-2364.
- Liu J X, Wang G C, Liu C M. 2006. The improvement and development of the multi-function ASTATIC software [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 28(4): 346-351.
- Liu J X, Yan F B, Su Y R, *et al.* 2017. Research status and development trend of the portable near-surface FDEM instrument [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(11): 4352-4363, doi: 10.6038/cjg20171123.
- Luo M, Li Y G, Li G. 2016. Frequency-domain inversion of marine CSEM data in one-dimensional vertically anisotropic structures [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(11): 4349-4359, doi: 10.6038/cjg20161134.
- Müller H, Schwalenberg K. 2016. Electromagnetic imaging of seafloor massive sulfide deposits at the Central Indian Ridge [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. 18: 17702.
- Myer D G, Constable S, Key K. 2006. Electromagnetic exploration of the Loihi seamount [C]//AGU Fall Meeting Abstracts.
- Niu Y T, Bi Y X, Li L, *et al.* 2016. VLF method prospecting based on software radio [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 31(1): 0280-0284, doi: 10.6038/pg20160132.
- Puzyrev V, Koldan J, de la Puente J, *et al.* 2013. A parallel finite-element method for three-dimensional controlled-source electromagnetic forward modelling [J]. *Geophysical Journal International*, 193(2): 678-693.
- Ren Z Y, Kalscheuer T, Greenhalgh S, *et al.* 2013. A goal-oriented adaptive finite-element approach for plane wave 3-D electromagnetic modelling [J]. *Geophysical Journal International*, 194(2): 700-718, doi: 10.1093/gji/ggt154.
- Ren Z Y, Tang J T. 2009. Finite element modeling of 3-D DC resistivity using locally refined unstructured meshes [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2627-2634, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.023.
- Sandberg S K, Hohmann G W. 1982. Controlled-source audiomagnetotellurics in geothermal exploration [J]. *Geophysics*, 47(1): 100-116.
- Sternberg B K, Washburne J C, Pellerin L. 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings [J]. *Geophysics*, 53(11): 1459-1468.
- Swidinsky A, Hölz S, Jegen M. 2012. On mapping seafloor mineral deposits with central loop transient electromagnetics [J]. *Geophysics*, 77(3): E171-E184.
- Tang J T, He J S. 1994. A new method to define the full-zone resistivity in horizontal electric dipole frequency soundings on a layered earth [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 37(04): 543-552.
- Tang J T, He J S. 2005. Methods and Applications of CSAMT (in Chinese) [M]. Changsha: Central South University Press.
- Tang J T, Liu Z J, Liu F Y, *et al.* 2015a. The denoising of the audio magnetotelluric data set with strong interferences [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(12): 4636-4647, doi: 10.6038/cjg20151225.
- Tang J T, Ren Z Y, Zhou C, *et al.* 2015b. Frequency-domain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface: A review [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(8): 2681-2705, doi: 10.6038/cjg20150807.
- Tang J T, Wang F Y, Ren Z Y. 2010. 2.5-D DC resistivity modeling by adaptive finite-element method with unstructured triangulation [J]. *Chinese J. Geophys.*, 53(3): 708-716, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.03.026.
- Tang J T, Xu Z M, Xiao X, *et al.* 2012. Effect rules of strong noise on magnetotelluric (MT) sounding in Luzong ore cluster area [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(12): 4147-4159, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.027.
- Tegnaner J F. 2017. Electromagnetic Modelling and Inversion of Seafloor Massive Sulphide Deposits-Imaging of SMS Deposits and the Asthenosphere at the Atlantic Mid-Ocean Ridge [D]. NTNU.
- Tikhonov A N. 1950. On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust [J]. *Dokl. Acad. Nauk. SSSR*, 73: 295-297.
- Xi Z Z, Li R X, Song G, *et al.* 2016. Electrical structure of sea-floor hydrothermal sulfide deposits [J]. *Earth Science* (in Chinese), 41(8): 1395-1401, 10.3799/dqkx.2016.110.
- Xie M B, Tan H D, Wang K P, *et al.* 2017. Study on the characteristics of 3D CSAMT tensor impedance data [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 32(2): 0522-0530, doi: 10.6038/pg20170210.
- Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2007. The progress of TEM in theory and application [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.04.026.



- Xue G Q, Li X, Di Q Y. 2008. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 23(4): 1165-1172.
- Xue G Q, Qin K Z, Li X, *et al.* 2011. Discovery and TEM detection for a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(3): 954-960, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 03. 022.
- Xue G Q, Wu X, Li H, *et al.* 2016a. Progress of multi-transient electromagnetic method in abroad [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(5): 2187-2191, doi: 10.6038/pg20160542.
- Xue G Q, Yan S, Chen W Y. 2016b. A fast topographic correction method for electromagnetic data [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 59(12): 4408-4413, doi: 10.6038/cjg20161202.
- Xue G Q, Yu J C. 2017. New development of TEM research and application in coal mine exploration [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(1): 0319-0326, doi: 10.6038/pg20170145.
- Yin C C, Ren X Y, Liu Y H, *et al.* 2015a. Exploration capability of airborne TEM systems for typical targets in the subsurface [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 58(9): 3370-3379, doi: 10.6038/cjg20150929.
- Yin C C, Zhang B, Liu Y H, *et al.* 2015b. Review on airborne EM technology and developments [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 58(8): 2637-2653, doi: 10.6038/cjg20150804.
- Yue J H, Yang H Y, Deng J Z. 2012. Whole-space effect on underground transient electromagnetic field in layered media [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 27(4): 1385-1392, doi: 10.6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 04. 012.
- Zhang G, Tuo X G, Wang X B, *et al.* 2016. Analysis on remote reference magnetotelluric effect base on different parameters [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(6): 2458-2466, doi: 10.6038/pg20160614.
- Zhou J M, Li X, Qi Z P. 2016. Research progress on marine transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(3): 1406-1412, doi: 10.6038/pg20160365.
- Zonge K L, Hughes L J. 1998. Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics submitted for inclusion in Nabighian [J]. MN, E M Methods in Applied Geophysics. SEG, 9: 1-11.
- 嵇艳鞠, 黄廷哲, 黄婉玉, 等. 2016. 起伏地形下各向异性的 2D 大地电磁无网格法数值模拟[J]. 地球物理学报, 59(12): 4483-4493, doi: 10.6038/cjg20161211.
- 李帝铨, 谢维, 程党性. 2013. E-Ex 广域电磁法三维数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 23(9): 2459-2470.
- 李瑞雪, 王鹤, 席振铎, 等. 2016. 深海热液硫化物矿体 3D 瞬变电磁正演[J]. 地球物理学报, 59(12): 4505-4512, doi: 10.6038/cjg20161213.
- 李永兵, 陈绪松, 刘建明, 等. 2005. 利用 VBA 和 Excel 实现快速处理国产甚低频电磁仪 DDS-I 测量数据[J]. 地球物理学进展, 20(1): 225-230, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2005. 01. 039.
- 柳建新. 1990. 可控源音频大地电磁法数据处理系统的研究与应用[硕士论文]. 长沙: 中南工业大学.
- 柳建新, 何继善, 白宜诚, 等. 2001. 一种区分矿与非矿的有效方法-伪随机多频相位法原理及其应用[J]. 中国地质, 28(9): 41-46.
- 柳建新, 佟铁钢, 刘春明, 等. 2013. E-E<sub>φ</sub> 广域视电阻率定义的改进方法及场特性识别[J]. 中国有色金属学报, 23(9): 2359-2364.
- 柳建新, 王贵财, 刘春明. 2006. 多功能 ASTATIC 软件的改进与开发[J]. 物探化探计算技术, 28(4): 346-351.
- 柳建新, 严发宝, 孙艳蕊, 等. 2017. 便携式近地表频率域电磁法仪器研究现状与发展趋势[J]. 地球物理学报, 60(11): 4352-4363, doi: 10.6038/cjg20171123.
- 罗鸣, 李予国, 李刚. 2016. 一维垂直各向异性介质频率域海洋可控源电磁资料反演方法[J]. 地球物理学报, 59(11): 4349-4359, doi: 10.6038/cjg20161134.
- 牛有田, 毕永兴, 李玲, 等. 2016. 基于软件无线电的甚低频法探矿的研究[J]. 地球物理学进展, 31(1): 280-284, doi: 10.6038/pg20160132.
- 任政勇, 汤井田. 2009. 基于局部加密非结构化网格的三维电阻率法有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 52(10): 2627-2634, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 10. 023.
- 汤井田, 何继善. 1994. 水平电偶源频率测深中全区视电阻率定义的新方法[J]. 地球物理学报, 37(04): 543-552.
- 汤井田, 何继善. 2005. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社.
- 汤井田, 刘子杰, 刘峰屹, 等. 2015a. 音频大地电磁法强干扰压制试验研究[J]. 地球物理学报, 58(12): 4636-4647, doi: 10.6038/cjg20151225.
- 汤井田, 任政勇, 周聪, 等. 2015b. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 58(8): 2681-2705, doi: 10.6038/cjg20150807.
- 汤井田, 徐志敏, 肖晓, 等. 2012. 庐枞矿集区大地电磁测深强噪声的影响规律[J]. 地球物理学报, 55(12): 4147-4159, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 027.
- 席振铎, 李瑞雪, 宋刚, 等. 2016. 深海热液金属硫化物矿电性结构[J]. 地球科学, 41(8): 1395-1401, doi: 10.3799/dqkx. 2016. 110.
- 谢茂笔, 谭捍东, 王堃鹏, 等. 2017. 可控源音频大地电磁法三维张量阻抗响应特征研究[J]. 地球物理学进展, 32(2): 522-530, doi: 10.6038/pg20170210.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1195-1200, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2007. 04. 026.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2008. 瞬变电磁法正反演问题研究进展[J]. 地球物理学进展, 23(4): 1165-1172.

## 附中文参考文献

- 蔡剑华, 肖永良. 2017. Hilbert-Huang 变换与傅里叶变换在大地电磁数据处理中的适用性分析[J]. 地球物理学进展, 32(4): 1548-1555, doi: 10.6038/pg20170418.
- 戴前伟, 余凯, 冯德山, 等. 2010. 探地雷达及 EH4 对钼矿采空区的综合探测[J]. 地球物理学进展, 25(5): 1763-1768, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 05. 033.
- 底青云, Unsworth M, 王妙月. 2006. 2.5 维有限元法 CSAMT 数值反演[J]. 石油地球物理勘探, 41(1): 100-106.
- 何继善. 1991. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社.
- 何继善. 1994. 伪随机三频电法研究[J]. 中国有色金属学报, 4(1): 1-7, doi: 10.19476/j. ysx. 1004. 0609. 1994. 01. 001.
- 何继善. 2010a. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 41(3): 1065-1072.
- 何继善. 2010b. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 何继善. 2010c. 三元素集中的自封闭加法与 2<sup>n</sup> 系列伪随机信号编码[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(2): 633-637.
- 何继善, 柳建新. 2002. 伪随机多频相位法及其应用简介[J]. 中国有色金属学报, 12(2): 374-376, doi: 10.19476/j. ysx. 1004. 0609. 2002. 02. 036.
- 何继善, 佟铁钢, 柳建新. 2009. a<sup>n</sup> 序列伪随机多频信号数学分析及实现[J]. 中南大学学报(自然科学版), 40(6): 1666-1671.

薛国强, 秦克章, 李貅, 等. 2011. 西藏沙让特大型铅矿的发现与瞬变电磁法探查[J]. 地球物理学进展, 26(3): 954-960, doi: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 03. 022.

薛国强, 武欣, 李海, 等. 2016a. 多道瞬变电磁法(MTEM)国外研究进展[J]. 地球物理学进展, 31(5): 2187-2191, doi: 10.6038/pg20160542.

薛国强, 闫述, 陈卫营. 2016b. 电磁测深数据地形影响的快速校正[J]. 地球物理学报, 59(12): 4408-4413, doi: 10. 6038/cjg20161202.

薛国强, 于景邨. 2017. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 32(1): 319-326, doi: 10. 6038/pg20170145.

殷长春, 任秀艳, 刘云鹤, 等. 2015a. 航空瞬变电磁法对地下典型目标体的探测能力研究[J]. 地球物理学报, 58(9): 3370-3379, doi: 10. 6038/cjg20150929.

殷长春, 张博, 刘云鹤, 等. 2015b. 航空电磁勘查技术发展现状及展望[J]. 地球物理学报, 58(8): 2637-2653, doi: 10. 6038/cjg20150804.

岳建华, 杨海燕, 邓居智. 2012. 层状介质中地下瞬变电磁场全空间效应[J]. 地球物理学进展, 27(4): 1385-1392, doi: 10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 04. 012.

张刚, 庾先国, 王绪本, 等. 2016. 不同参数条件下远参考大地电磁处理效果对比分析[J]. 地球物理学进展, 31(6): 2458-2466, doi: 10. 6038/pg20160614.

周建美, 李貅, 戚志鹏. 2016. 海洋瞬变电磁法研究进展[J]. 地球物理学进展, 31(3): 1406-1412, doi: 10. 6038/pg20160365.